

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**João Augusto Buffon Junior**

**EFEITO DA ENERGIA E DA DEMORA DE COMPACTAÇÃO NA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS SOLO-CAL**

Porto Alegre  
Dezembro 2018

**JOÃO AUGUSTO BUFFON JUNIOR**

**EFEITO DA ENERGIA E DA DEMORA DE COMPACTAÇÃO NA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS SOLO-CAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento  
de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do  
título de Engenheiro Civil

**Orientador: Washington Peres Núñez**  
**Coorientadora: Thaís Radünz Kleinert**

Porto Alegre  
Dezembro 2018

**JOÃO AUGUSTO BUFFON JUNIOR**

**EFEITO DA ENERGIA E DA DEMORA DE COMPACTAÇÃO NA RESISTÊNCIA À  
COMPRESSÃO SIMPLES DE MISTURAS SOLO-CAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2018

Prof. Washington Peres Núñez  
Dr. Pelo PPGEC/UFRGS  
Orientador

Thaís Radünz Kleinert  
Ma. Pelo PPGEC/UFRGS, Brasil  
Coorientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Washington Peres Núñez (UFRGS)**  
Dr. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

**Prof. Lélío Antônio Teixeira Brito (UFRGS)**  
Phd pela University of Nottingham, Reino Unido

**Camila Kern (UFRGS)**  
Ma. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

**Thaís Radünz Kleinert (UFRGS)**  
Ma. pelo PPGEC/UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho aos meus pais, minha esposa e minha filha,  
que sempre manifestaram seu apoio incondicional a minha formação.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu pai João Augusto Buffon e minha mãe Marcia Regina Buffon que sem medir esforços dedicaram boa parte de suas vidas a minha formação, e que por causa disso são os principais responsáveis pela conclusão de mais essa etapa.

Agradeço também a minha esposa Kendra Danielly Buffon e minha filha Olivia Sofia Buffon que além de estarem sempre ao meu lado, ainda são minha principal motivação nos momentos difíceis.

Além disso, agradeço ao Professor Washington Peres Núñez e ao Professor Lélío Antônio Teixeira Brito por terem despertado meu interesse pela área da pavimentação, me proporcionando aprendizados que levarei para a vida inteira.

Também sou extremamente grato a minha coorientadora Thais Radünz Kleinert por toda a dedicação e disponibilidade guiando a pesquisa de maneira geral, e sanando possíveis dúvidas do percurso.

Sou agradecido à equipe do Laboratório de Geotecnologia (LAGEOTEC): Jair Silva, Lucas Marin Malabarba, Bruna Diniz, e Matheus Ferreira Matuella que de alguma forma contribuíram para que tenha sido possível a conclusão deste trabalho.

Também merecem o reconhecimento a equipe do Laboratório de pavimentação (LAPAV), principalmente aos técnicos Armando Mendicelli Neto e Mateus Freitas.

E para finalizar, sou grato aos grandes amigos que sempre estiveram ao meu lado durante toda a vida acadêmica sendo eles de extrema importância na conclusão desta etapa.

A alegria está na luta, na tentativa, no sofrimento  
e não na vitória propriamente dita.  
*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

O tratamento de um solo a partir da adição de cal é a mais antiga técnica de modificação química do solo. Essa é desenvolvida em conjunto com o tratamento físico proporcionado pela compactação. A combinação dos métodos pode elevar o desempenho do pavimento, além de resultar em ganhos ambientais e econômicos. No Brasil, a técnica é utilizada em menor escala, devido à carência de documentação técnica qualificada. Dessa forma, esse trabalho foi desenvolvido com o intuito de compreender o efeito de algumas incertezas construtivas no comportamento mecânico de misturas solo-cal quanto ao seu emprego como camada de pavimento. Para isso, foi selecionado um Argissolo Vermelho Amarelo do Estado do Rio de Janeiro, situado em parte do traçado da BR-101, rodovia na qual a técnica já é empregada. O objetivo principal consistiu no estudo dos efeitos da energia e da demora de compactação na resistência à compressão simples (RCS) de diferentes misturas, aos 7 dias de cura. Dessa forma, foram adotadas as energias Proctor Normal e Modificada, com demora entre a mistura e a compactação de 1, 4 e 24 horas. A fim de compreender a influência do tipo de cal e do seu teor, amostras foram moldadas com cal calcítica e dolomítica nos teores de 3 e 5%. A partir dos resultados, verificou-se que, dentre os fatores controláveis estudados, a energia de compactação demonstrou ser o mais significativo, apresentando maiores resistências para os corpos de prova moldados na energia Modificada. Em seguida, o tipo de cal também demonstrou ser significativo, de modo que o emprego da cal calcítica proporcionou melhores resultados. A demora entre a mistura e a compactação de 4 para 24 horas não resultou em diferenças significativas na RCS das misturas, porém verificou-se uma pequena redução na resistência quando compactadas após 1 hora de mistura. Para os níveis analisados, o teor de cal não demonstrou ser significativo. Dessa forma, conclui-se que para aplicação do método, os melhores resultados foram obtidos com o emprego da energia modificada associada a cal calcítica, independentemente do teor, e a demora na compactação deve respeitar os tempos entre 4 e 24 horas. Ressalta-se, no entanto, que os resultados obtidos são restritos aos materiais e condições estudadas.

Palavras-chave: pavimentação, estabilização solo-cal, energia de compactação, resistência

## ABSTRACT

The treatment of soil from the addition of lime is the oldest technique of chemical modification of the soil. This is developed in conjunction with the physical treatment provided by the compaction. The combination of methods can increase pavement performance, as well as result in environmental and economical gains. In Brazil, the technique is used in a smaller scale due to the lack of qualified technical documentation. The work was developed with a purpose of understanding the effect of some constructive uncertainties of the mechanical behavior of the soil-lime mixtures in relation to their use as a pavement layer. For this, a Red Yellow Argissolo was selected from Rio de Janeiro, located on part of the BR-101 highway, where the technique is already in use. The main objective was to study the effects of energy and compression delay on the Unconfined compression strength test (UCS) of different mixtures at seven days of cure. Thus, the Normal Proctor and the Modified energies were adopted, with delay between mixing and compaction of 1, 4 and 24 hours. In order to understand the influence of the type of lime and its content, samples were molded with calcitic lime and dolomitic lime in the contents of 3 and 5%. Through the results, it was verified that among the controllable factors studied, the compaction energy showed to be the most significant, presenting greater resistance for the molded test pieces in the modified energy. Shortly after, the type of lime also proved to be significant, showing that the use of calcitic lime gave better results. The delay between mixing and compacting from 4 to 24 hours did not result in significant differences in the (UCS) of the blends, but there was a small reduction in strength when compacted after one hour of blending. By analyzing the levels, the lime content was not shown to be significant. It was concluded that for the application of the method, the best results were obtained with the use of modified energy associated with calcitic lime, and the compaction should respect the times between 4 and 24 hours. It should be noted, however, that the results obtained are restricted to the materials and conditions studied.

Palavras-chave: pavimentation, lime estabilization, compaction soil, strength



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Solos lateríticos e saprolíticos no Brasil .....	16
Figura 2 - Perfil dos solos tropicais .....	17
Figura 3 - Mecanismo de troca catiônica.....	21
Figura 4 - Efeito do tempo de cura solo-cal.....	24
Figura 5 - Influência do tempo de cura 28, 60, 90 dias .....	25
Figura 6 - Jazida do Solo no município de Silva Jardim .....	27
Figura 7 - Solo sendo descarregado e disposto no LAPAV.....	28
Figura 8 - Solo em condições naturais.....	28
Figura 9 - Cales.....	31
Figura 10 - Método do pHs.....	33
Figura 11 - Método da Plasticidade .....	33
Figura 12 - Preparação do material antes da compactação .....	34
Figura 13 - Retirada da amostra de umidade após a compactação .....	35
Figura 14 - Compactação do Corpo de Prova.....	36
Figura 15 - Ensaio de Resistência a Compressão Simples .....	37
Figura 16 - Câmara úmida .....	38
Figura 17 - Moldagem energia modificada.....	39
Figura 18 - Curvas de compactação Proctor normal.....	42
Figura 19 - Curvas de compactação Proctor modificada.....	43
Figura 20 - Massa específica máxima para diferentes energias.....	44
Figura 21 - Teor de umidade ótimo para diferentes energias .....	45
Figura 22 - Comparação de RCS energia norma e modificada .....	46
Figura 23 - Curva de ruptura de acordo com a energia de compactação .....	47
Figura 24 - Demora na compactação energia normal .....	48
Figura 25 - Demora na compactação energia modificada .....	49
Figura 26 - Relevância das variáveis analisadas.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do solo .....	29
Tabela 2 - Composição química do solo.....	30
Tabela 3 - Composição química das cales .....	32
Tabela 4 - Hipóteses testadas.....	40
Tabela 5 - Resultados curva de compactação .....	44
Tabela 6 - RCS por energia de compactação .....	46
Tabela 7 - Resultados RCS para diferentes demoras de compactação .....	48

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS**

ABNT–Associação brasileira de normas técnicas

CP– Corpo de prova

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

$\gamma_{sm\acute{a}x}$  – massa específica aparente seca máxima

LAGEOTEC – Laboratório de Geotecnologia da UFRGS

LAPAV – Laboratório de Pavimentação da UFRGS

LEME – Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais da UFRGS

RCS – Resistência à compressão simples

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

$\omega_{\acute{o}t}$  – Teor de umidade ótimo

## Sumário

1 INTRODUÇÃO .....	12
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	13
1.2.1 Objetivo Principal .....	13
1.2.2 Objetivo Secundário.....	13
1.3 PRESSUPOSTO .....	14
1.4 PREMISSA .....	14
1.5 DELIMITAÇÕES .....	14
1.6 LIMITAÇÕES .....	14
1.7 DELINEAMENTO .....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	16
2.1 SOLOS TROPICAIS .....	16
2.1.1 Solos lateríticos.....	17
2.1.2 Solos saprolíticos .....	18
2.2 CALES.....	19
2.3 SOLO-CAL.....	20
2.3.1 Reações de solos tratados com cal .....	20
2.3.2 Influência do solo.....	22
2.3.3 Influência do tempo de cura.....	23
2.4 COMPACTAÇÃO DOS SOLOS .....	25
2.5 RESISTENCIA A COMPRESSÃO SIMPLES .....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	27
3.1 SOLO .....	27
3.1.1 Características do solo .....	29
3.2.1 Caracterização das cales .....	31
3.2.2 Teor das cales.....	32
3.3.1 Proctor Normal.....	35
3.3.1 Proctor Modificada .....	35
3.4.1 Tempo de cura.....	37
3.4.2 Demora na compactação .....	38
3.4.2 Moldagem dos corpos de prova .....	39
3.5 HIPÓTESES ENSAIADAS.....	40
3.6 ANÁLISE DE RESULTADOS .....	41
4 RESULTADOS .....	42
4.1.1 Energia Proctor Normal .....	42
4.1.2 Energia Proctor Modificada.....	43
4.2.1 Efeito da energia de compactação.....	45
4.2.2 Demora na Compactação .....	47
5 CONCLUSÕES .....	52

## 1 INTRODUÇÃO

As malhas rodoviárias, em alguns países, são a principal forma de ligação terrestre entre pontos geograficamente distantes de seu interior, sua relevância é tamanha, que as condições econômicas do lugar podem ser medidas através deste modal. Dessa forma, projetos rodoviários bem elaborados, que garantam conforto, agilidade e segurança aos usuários por um longo período de tempo, devem estar presentes em qualquer plataforma de governo.

Estes projetos, porém, devem levar em conta a associação de 3 fatores que nem sempre apontam para uma mesma direção, são eles: sustentabilidade, economia e desempenho. Uma vez que com o passar dos anos, a quantidade de veículos e a carga distribuída em seus respectivos eixos aumentam exponencialmente, os recursos naturais utilizados em varias técnicas para amortecer esses impactos diminuem. Com isso, obras capazes de maximizar o aproveitamento dos insumos naturais locais se mostram cada vez mais vantajosas.

Entretanto, nem todo o cenário é o ideal para a aplicação desse conceito de projeto. Muitas vezes o subleito, responsável por absorver as cargas solicitadas bem como se mostrar imune às intempéries, apresenta baixo desempenho e pode comprometer toda a estrutura de uma futura rodovia. Tal situação, além de aumentar naturalmente o custo total da obra, ainda reduz a durabilidade daquilo que normalmente é o maior investimento da estrutura, a camada superior pavimentada. Desta forma, vários são os métodos empregados para a busca deste melhor desempenho, dentre eles, a estabilização de solos com a adição de cal, que é uma alternativa econômica e sustentável, capaz de modificar as propriedades do solo natural elevando seus níveis de resistência e durabilidade.

Essa técnica de estabilização química, embora seja a mais antiga do mundo, começou a ter sua aplicação mais profundamente estudada apenas no período pós-segunda guerra com destaque para países como Estados Unidos e França. No Brasil, porém, mesmo nos dias atuais, a ausência de uma normatização nacional, gera inúmeras incertezas construtivas, fazendo com que o método seja pouco utilizado.

Foi com o objetivo de contribuir com o quadro brasileiro atual, que o trabalho em questão avaliou algumas variações de aplicação da técnica quanto a sua influência na resistência a

compressão simples. Para isso, buscou-se um solo do Rio de Janeiro em que a técnica já é aplicada.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos do trabalho podem ser divididos em um objetivo principal e outro secundário, sendo cada um deles explicitados nos itens a seguir.

### **1.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal do trabalho foi medir o efeito da energia e da demora de compactação na resistência à compressão simples de misturas solo-cal.

### **1.2.2 Objetivo Secundário**

Testar a influência do tipo e teor das cales na resistência à compressão simples de misturas solo-cal.

### 1.3 PRESSUPOSTO

O trabalho parte do pressuposto que um considerável número de tipos solo, quando tratados com cal, podem apresentar melhoria de suas características. No Brasil, porém, a técnica ainda é pouco popular e estudos que comprovem sua eficácia podem contribuir quando tratado com cal e justamente por ser uma técnica ainda pouco popular no Brasil, exigem estudos que comprovem sua eficácia.

### 1.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que o tratamento do solo com cal ainda não apresenta uma normatização nacional específica, e que avaliações são necessárias para definir alguns critérios construtivos que proporcionem melhores resultados.

### 1.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se aos efeitos produzidos na resistência à compressão simples do solo tratado.

### 1.6 LIMITAÇÕES

O trabalho limita-se a 1 tipo de solo, 2 tipos de cales (calcítica e dolomítica) com teores de 3 e 5% na mistura, da mesma forma que considera a demora na compactação de 1, 4 ou 24 horas e ainda energias de compactação Normal e Modificada.

### 1.7 DELINEAMENTO

As etapas que compõem o trabalho são as seguintes:

- a) Pesquisa bibliográfica;
- b) Elaboração do plano experimental;
- c) Aquisição e caracterização dos materiais;
- d) Ensaios laboratoriais;
- e) Análise dos resultados;
- f) Considerações finais.

Em um primeiro momento, buscou-se, através de pesquisas bibliográficas, uma fundamentação teórica para o correto desenvolvimento da pesquisa. Em seguida, a elaboração do plano experimental foi um importante passo para a organização do trabalho e teve como objetivo o ordenamento dos processos. A caracterização dos materiais foi o próximo passo, pois o conhecimento do material de estudo é um processo importantíssimo que além de permitir a observação de como a cal reage em solos distintos, ainda garante a comparação dos resultados com e sem a aplicação da técnica.

Em posse das características dos materiais foi possível dar continuidade a parte mais específica do estudo. O ensaio de compactação forneceu dados de teor de umidade ótimo e massa específica aparente seca máxima para cada mistura, com eles, foram moldados os corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão simples. Por fim, foram feitas as análises dos resultados seguidas por considerações finais que elucidam sobre a influência dos fatores analisados na resistência à compressão simples de um solo tratado com cal.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 SOLOS TROPICAIS

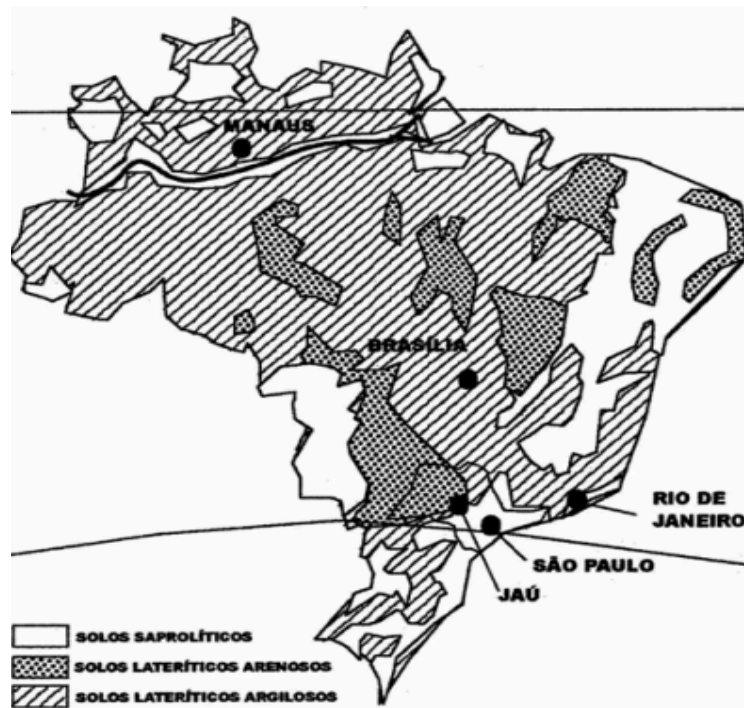
De acordo com Terzaghi & Peck (1962) apud Winterkorn & Fang (1991) os solos, de maneira geral, são materiais compostos de partículas minerais, herdadas da rocha matriz que ocorrem na superfície da crosta terrestre. Esses materiais, quando dispostos na zona entre o trópico de câncer e o trópico de capricórnio, são definidos como solos tropicais.

Levado em conta sua posição geográfica, esses solos apresentam uma série de peculiaridades, e Castro (1987) definiu-os da seguinte forma:

“Um solo dito tropical tem sua mineralogia restrita (1:1) e óxidos livres, além de sílica livre na forma de quartzo podendo ocorrer pequena quantidade de material paracristalino. Todos esses minerais compartilham o fato de serem minerais cuja carga superficial é variável e depende do pH.”

Vaughan (1985), por outro lado, leva em conta as mudanças climáticas e define os solos tropicais como sendo um produto apenas da intemperização física e química de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas. A figura 1 apresenta a distribuição dos solos no Brasil.

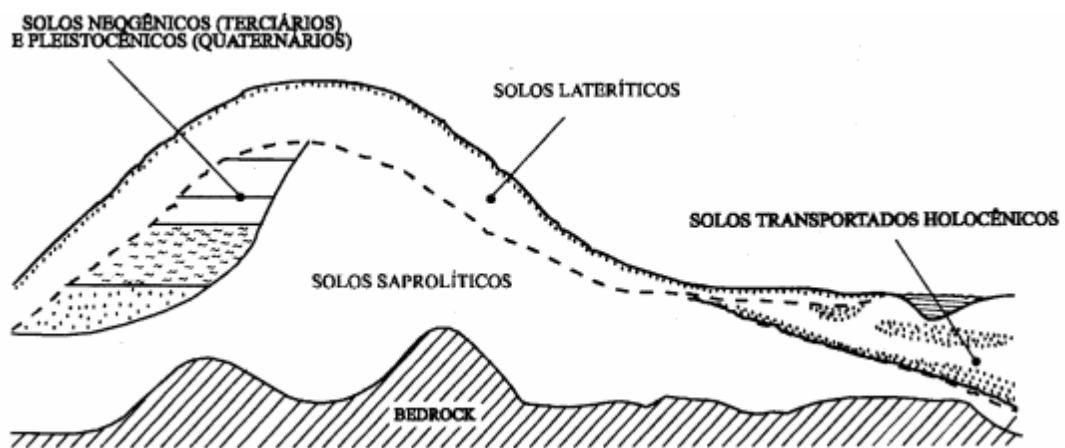
Figura 1 - Solos lateríticos e saprolíticos no Brasil



(fonte: VILLIBOR & NOGAMI, 2009)

Os solos da zona tropical podem ser divididos, Segundo Rezende (1999), em dois grupos, o laterítico e o saprolítico. O primeiro, residual ou não, intemperizado e rico em minerais de argilas e sesquióxidos formando a camada superficial. O saprolítico, localizado na camada mais profunda, mantém a estrutura da rocha de origem. A figura 2 descreve o perfil de um solo tropical.

Figura 2 - Perfil dos solos tropicais



(fonte: VILLIBOR & NOGAMI, 2009)

### 2.1.1 Solos lateríticos

De acordo com Nogami (1996) um solo laterítico é a parte mais superficial do subsolo. Está localizado em áreas bem drenadas, ou seja, acima do lençol freático e dessa forma, livre de cursos de água permanentes. Sua uniformidade e coloração (avermelhada, alaranjada ou amarela), faz com que o solo se destaque no perfil. Além disso, formam um capeamento recobrimdo as demais camadas de solos; e possuem aspecto uniforme não se percebendo, manchas, listras, camadas ou xistosidades.

Segundo Fookes (1997) apud Cardoso (2002), diferentemente dos solos de regiões temperadas, os solos residuais tropicais lateríticos sofrem um intemperismo tão intenso que quase nunca apresentam as mesmas características dos materiais de origem. Os autores ainda atentavam para a incorporação de húmus proveniente da decomposição de matéria orgânica.

Quimicamente, Fookes (1997) apud Cardoso (2002) ainda citavam que o óxidos de ferro e alumínio liberados pelo intemperismo tropical na superfície não são dissolvidos na mesma proporção que acontece em ambientes mais ácidos (regiões temperadas), e por consequência,

os mesmos estabilizam-se no local modificando-se. O óxido de ferro é cristalizado como hematita na época seca e como goethita em um ambiente de maior umidade. A gipsita é o principal óxido de alumínio formado, resultando num solo de cores predominantemente vermelhas (hematitas) ou amarelas (Goethitas).

Quanto à mineralogia, Nogami (1996) caracterizava os solos lateríticos tropicais por ter sua fração de areia constituída por quartzo, magnetita ilmenita, turmalita e o zircão, todos minerais suficientemente capazes de resistir ao intemperismo tropical. Além disso o autor complementa citando a ocorrência de quantidades variadas de concreções ferruginosas ou aluminosas, conhecidas como lateritas, que apresentam resistência mecânica inferior aos minerais referidos anteriormente. Nogami (1996) ainda afirma que a fração de argila é constituída de argilominerais da família da caulinita e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio, de maneira que esses óxidos envolvem os argilominerais, resultando em uma microfábrica esponjosa ou “pipoca” muito característica.

### **2.1.2 Solos saprolíticos**

Os solos Saprolíticos de acordo com definição do *ISSMFE* (1985) são solos que resultam da decomposição ou desagregação *in situ* da rocha (considerada material consolidado da crosta terrestre), mantendo ainda, de maneira nítida a estrutura da rocha que lhe deu origem. Além disso Nogami e Villibor (1981) caracterizam o solo por apresentar manchas e mosqueamentos com feições herdadas da rocha matriz ou desenvolvida pela ação do intemperismo.

Nogami e Villibor (1981) ainda definem a constituição mineralógica dos solos saprolíticos pela presença de grande numero de minerais, parte dos quais são decorrentes de um processo de intemperização e parte herdadas da rocha matriz. Os minerais neoformados constituem, na maioria dos casos associações, muitas pseudomorfias, mas seus contornos são facilmente distinguíveis em microscopia de varredura. Na fração argila pode ocorrer grande variedade de argilominerais e a fração silte pode ter mineralogia muito variada e particular, como os macrocristais de caulinita e micas, que podem impor comportamentos peculiares a este solo.

Ainda segundo Nogami e Villibor (1995), os solos saprolíticos siltosos, micáceos e/ou caolínicos ou arenosos micáceos geralmente possuem valor de suporte abaixo das previsões baseadas nos índices classificatórios tradicionais ou dos grupos das classificações tradicionais.

Apresentam ainda, valor de expansão relativamente elevado, devido ao baixo limite de liquidez e índice de plasticidade.

## 2.2 CALES

A cal, de acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003), é definida como o pó obtido pela hidratação da cal virgem, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio ou ainda, de uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio. Historicamente a cal na construção civil está presente desde a época pré-histórica, segundo Miller (1999) existem indícios da utilização de cal em algumas regiões da Turquia que remontam a um período entre 12000 a 500 A.C.

Quanto a utilização, Bock (2012) define que a cal tem uma ampla gama de aplicações. Ela é utilizada na construção civil, siderurgia, pelotização, celulose, açúcar, fosfatos, alumínio, tratamento de água, químicos, cítricos e papel. O autor ainda cita que no ramo da construção civil ela é utilizada nas argamassas, pinturas, estabilização de solos, nas misturas asfálticas e nos blocos de tijolos construtivos.

Para a estabilização e modificação do solo, segundo Little (1999) várias formas de cal têm sido usadas com sucesso. Nos Estados Unidos, porém, a forma mais comum de utilização é a hidratada, sendo que em apenas 10% dos casos de tratamento do solo utiliza-se a cal virgem. Aprofundando-se ainda mais, o autor cita o fato de tanto a cal calcítica quanto a dolomítica apresentarem bons resultados de aplicação, mas ressalta diferenças físicas e químicas que influenciam na reatividade do solo-cal.

Dentre as diferenças mais importantes Little (1999) cita:

- a) A cal calcítica é até 100 vezes mais solúvel que a dolomítica, o que significa que a calcítica fornece mais cálcio livres ou disponíveis para estabilização;
- b) O Magnésio não afeta a solubilidade da cal mas pode retardar sua taxa de solução, o que pode afetar por consequência a taxa de reação da cal com o solo;
- c) Uma vez que a cal dolomítica se hidrata de forma mais lenta, ela pode não se hidratar completamente antes da compactação do solo estabilizado, podendo resultar em expansão após a compactação.

## 2.3 SOLO-CAL

Segundo Núñez (1991) o uso da cal para tratamento de solos é o mais antigo método de estabilização química conhecido, utilizado para as mais variadas aplicações. Ao longo da história seu uso se fez presente em diversas obras ao redor do mundo e alguns exemplos foram citados por Núñez (1991):

- a) A grande Muralha da China (3000 A.C);
- b) Obras do império romano, como a Via Appia construída (312 A.C), o Santuário de Fortuna na Palestina (80 A.C), vários aquedutos na Constantinopla e na França;
- c) No Brasil, os registros apontam para seu uso em cidades históricas como Ouro Preto e Diamantina em Minas Gerais e Parati no Rio de Janeiro.

Ainda como consta na tese de Núñez (1991), embora presente ao longo da história, foi a partir da segunda guerra mundial que o uso da solo-cal tomou outras dimensões. Como expoentes na utilização tem-se na América Norte estados como Texas por exemplo, e na Europa o maior destaque vai para França.

Estabilizar um solo com cal significa provocar mudanças químicas capazes de transformar solos instáveis em solos estruturalmente capazes. De maneira geral, as características que sofrem alterações após o tratamento são as que garantem redução dos danos causados pela umidade, diminuição do número de vazios, aumento da resiliência e das resistências quanto a fratura, fadiga e deformação permanente, como consta em Little (2000).

### 2.3.1 Reações de solos tratados com cal

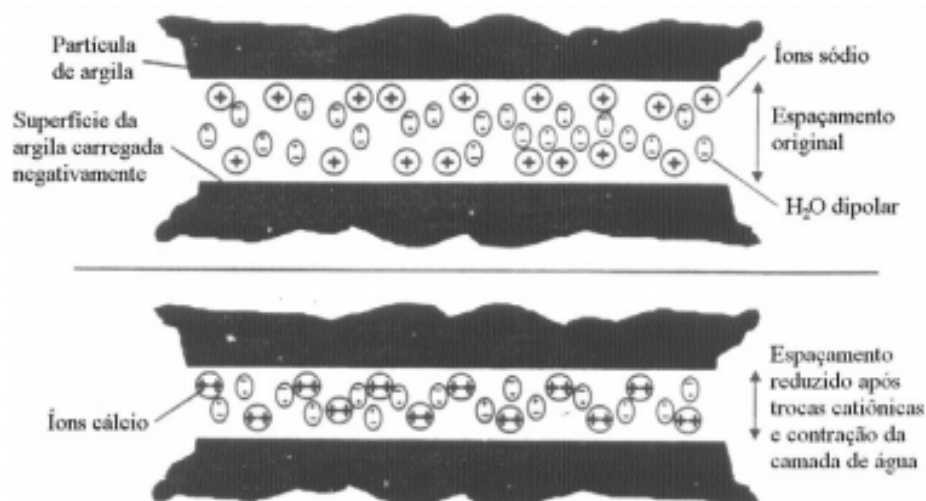
Segundo Sherwood (1958), as alterações observadas por Little (2000), acontecem pois quando a cal é adicionada em solos de granulometria fina um efeito imediato é provocado nas propriedades do solo, uma vez que a troca de cátions começa a substituir as ligações metálicas dos íons associados com a superfície das partículas da argila e os íons de cálcio da cal.

Sherwood (1958) ainda observa que as partículas de argilas são cercadas por uma dupla camada difusa e hidratada que é modificada pela troca de íons do cálcio. Tal fenômeno, segundo o autor, altera densidade do carregamento elétrico no entorno das partículas de argila o que leva elas a

serem atraídas pra mais perto uma das outras e dessa forma formarem flocos, o processo é conhecido por floculação.

A teoria é reforçada por Prusinki e Bhattacharja (1999) que dizem que a superfície do argilomineral é deficiente em carga e, para neutralizar essa deficiência, cátions e moléculas de água são atraídos para a superfície de clivagem carregada negativamente. Isso resultará em uma separação de duas camadas, chamada dupla camada difusa. Os mesmos autores relatam que a floculação e a aglomeração causam mudanças na textura da argila, pois sua estrutura é alterada de plana e paralela para uma orientação aleatória de partículas. A troca catiônica é ilustrada na figura 3.

Figura 3 - Mecanismo de troca catiniônica



(fonte: PRUSINKI; BHATTACHARA, 1999)

Segundo Diamond e Kinter (1972) as reações que ocorrem no solo-cal podem ser divididos em dois estágios relativamente bem definidos:

- a) um processo rápido que leva de minutos a dias e em alguns casos específicos meses, na qual a melhora se concentra na plasticidade e pouca resistência permanente é desenvolvida.
- b) um processo lento, que leva de semanas a anos e que desenvolve uma maior resistência com a formação de produtos cimentantes.

Sherwood (1995) e Little (1999), seguem o mesmo caminho de Dimond e Kinter (1972) e definiram que o tratamento de solo com cal pode ser utilizado tanto para modificação quanto

para estabilização. As modificações, segundo os autores, provocam mudanças substanciais em argilas altamente plásticas e isso ocorre principalmente pela referida troca de catiônica do cálcio fornecido pela cal, pelos cátions adsorvidos na superfície do argilomineral. Eles ainda citam, que os melhoramentos também são causados pela reação da cal hidratada com a superfície argilomineral em um ambiente de pH elevado. E com o resultado desse mecanismo tem-se um menor valor de plasticidade, diminuição da capacidade de segurar umidade, redução do volume e mudanças na estabilidade.

Por outro lado, Sherwood (1995) e Little (1999), observaram que a estabilização diferente da modificação do solo, apresenta a longo prazo um significativo ganho de resistência causado por uma demorada reação pozolânica, que nada mais é que a formação de silicato de cálcio hidratados e aluminatos de cálcio hidratado, e isso ocorre, pois o cálcio da cal reage com os aluminatos e silicatos solubilizados na superfície do argilomineral. A estabilização do solo com cal normalmente aumenta em até dez vezes a rigidez, em comparação com um solo não tratado.

Um solo pode ser modificado ou estabilizado pelo tratamento com cal, segundo Hilt e Davidson (1960) ao adicionar cal ao solo argiloso, primeiramente é preciso satisfazer a afinidade do solo pela cal, e íons são adsorvidos pelo argilomineral de maneira que não ficam disponíveis para as reações pozolânicas, tornando o solo modificado. A sobra de íons permite que as reações cimentícias ocorram, algo observado por Little (1995) quando concluiu que solos modificados pela cal podem evoluir para solos estabilizados através da adição de altas quantidades de cal de acordo com o critério de mistura.

### **2.3.2 Influência do solo**

Uma vez que as reações pozolânicas dependem da afinidade entre o solo e a cal, não são todos os tipos de solo que se mostram apropriados para estabilização. Thompson (1966) denominou de reativos à cal, solos que apresentam substancial ganho de resistência, mais precisamente, 345 Kn/m<sup>2</sup>, após 28 dias de cura a temperatura de 22,8° C. Solos com ganho de resistência inferior a esse são denominados não reativos.

Harty e Thompson (1973) apud Nunes (1991), desenvolveram estudos no intuito de concluir quais os tipos de solo se mostram mais propícios ao tratamento com cal, tanto no que diz respeito a velocidade de reação quanto ao seu máximo potencial, para tanto, os autores

adotaram o sistema americano de classificação de solos, dividindo-os em oxissolos e ultissolos, sendo que:

- a) Oxissolos: apresentam um horizonte óxido, caracterizado por concentração relativa de óxidos livres, argilas pouco ativas e virtual ausência de minerais de fácil intemperização;
- b) Ultissolos: apresentam horizonte argílico e suficiente grau de lixivação e alteração para produzir baixa saturação em todo solo.

Dentre outras constatações, Harty e Thompson (1973) apud Nunes (1991) concluíram que:

- a) Nenhuma propriedade do solo é suficiente por si só, para prever com precisão a reatividade de solos intemperizados, tropicais ou subtropicais, ao tratamento com cal;
- b) A quantidade de sílica e alumina necessária para a ocorrência da reação pozolânica parece ser relativamente pequena;
- c) O tipo de intemperismo que predominou na modificação de determinado tipo de solo influencia diretamente no potencial de reatividade;
- d) Para os ultissolos o pH do solo é um índice confiável tanto de intemperismo quanto de reatividade a cal;
- e) A drenagem do solo, o teor de ferro removível, a presença de carbonatos livres e de sulfatos não apresentam influência na reatividade da cal em solos intemperizados, tropicais e subtropicais;
- f) Os teores de cal para maximizar resistências de solos, nas regiões tropicais e sub-tropicais, são maiores que em região de clima temperado.

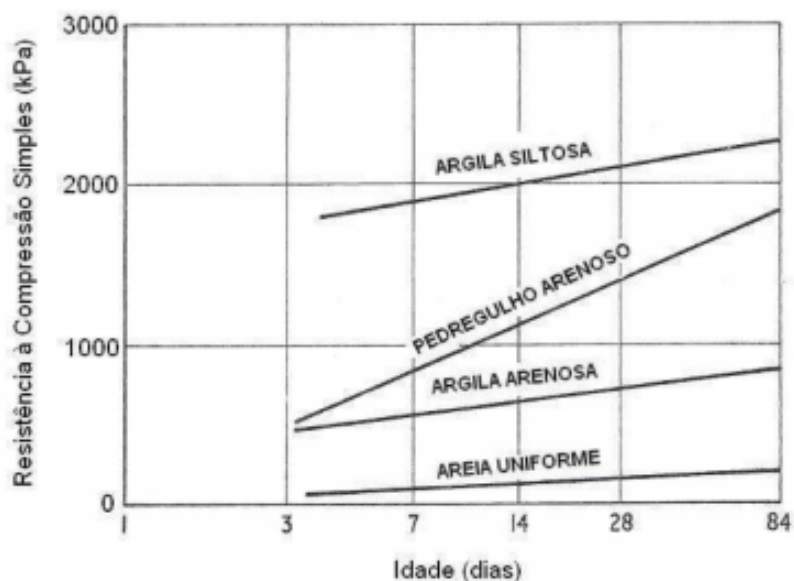
De acordo com Thompson (1964) e reforçado por Queiroz de Carvalho (1979), um solo com teor de matéria orgânica maior que 1% não produz resultados de estabilização após o tratamento, concluindo-se dessa forma que os menores ganhos de resistência se dão em solos de maior teor de matéria orgânica

### **2.3.3 Influência do tempo de cura**

A influência do tempo de cura em uma mistura solo-cal, foi verificada através de um estudo apresentado por Ingles e Metcalf (1972) apud Lopes (2007). Neste estudo é possível verificar que solos argilo-siltosos aumentam o valor de resistência com o aumento do tempo de cura. Os resultados mostravam que para todos os tipos de solo, quando aumentado o tempo de cura das misturas, ocorre um aumento linear da resistência a compressão simples. A figura 4 apresenta a conclusão à cima.



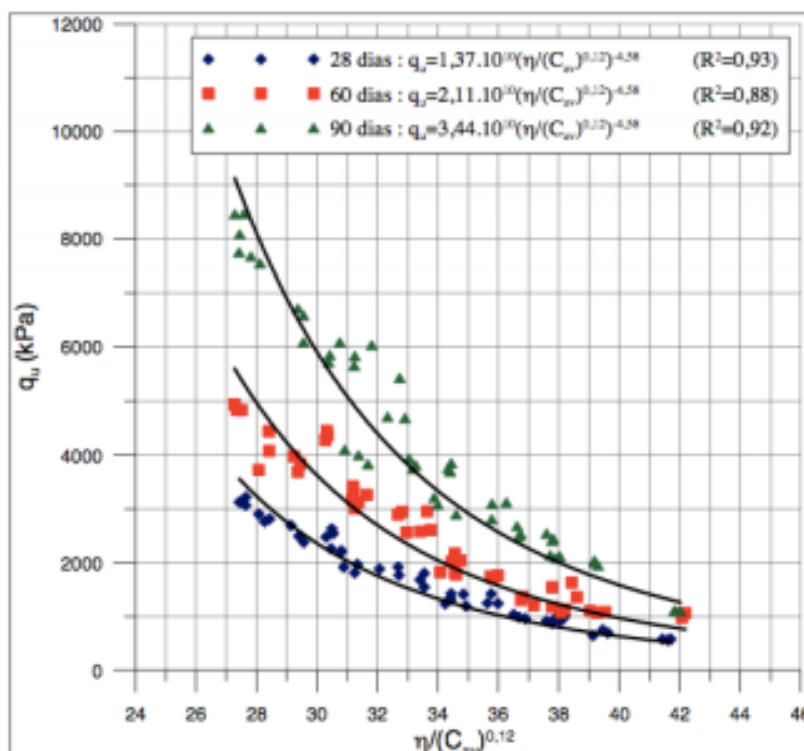
Figura 4 - Efeito do tempo de cura solo-cal



(fonte INGLES; METCALF, 1972)

Dalla Rosa (2009) em outro estudo deixou amostras para serem curadas durante os tempos de 28, 60 e 90 dias. Pode-se observar que quando o tempo de cura passou de 60 para 90 dias houve um aumento de cerca de 65% na resistência, por outro lado, a resistência obtida para um tempo de cura de 28 dias se torna 50% inferior àquela obtida nas amostras com 60 dias de cura. Os ensaios de 90 dias ao ser comparado com o de 28 elevam a resistência em média 150%. Os resultado dos testes estão na figura 5.

Figura 5 - Influencia do tempo de cura 28, 60, 90 dias



(fonte: DALLA ROSA, 2009)

## 2.4 COMPACTAÇÃO DOS SOLOS

De acordo com Pinto (2006), compactação é a densificação do solo por meio de equipamento mecânico, geralmente rolo compactador, soquetes, sapos e etc, acarretando na redução do volume de vazios, aumento da resistência, diminuição da permeabilidade e da variação volumétrica por umedecimento e secagem. R. Proctor e O. J. Porter

Embora um processo muito antigo, foi com Proctor (1930) que as diretrizes começaram a ser traçadas, e de acordo com o engenheiro, a densidade que o solo atinge após determinada energia de compactação ser aplicada, depende da umidade do solo no momento que o processo ocorre. Proctor (1930) ainda verificou que para umidades mais elevadas, a água provoca um determinado efeito de lubrificação entre as partículas, que deslizam entre si, acomodando-se em um arranjo mais compacto. Porém, ao se compactar com baixa umidade, segundo o engenheiro, o atrito entre as partículas é muito alto e não potencializa a redução de vazios.

Segundo Souza Junior (2005), há portanto, para uma dada energia, uma densidade máxima que é obtida para um determinado teor de umidade denominado ótimo, onde fica configurada uma relação ideal entre ar, água e solo no processo de compactação.

Proctor (1930) em seus estudos já constatava o que Souza Junior (2005) especificou e para tanto criou o ensaio de compactação que visa determinar a umidade ótima para uma específica energia de compactação.

Ainda, em artigo publicado por Trindade (2005) que mediu a influência do tempo decorrido entre a mistura e a compactação de solo-RBI grade 81, percebeu-se que na maioria dos casos o aumento da demora entre a mistura e a compactação age em favor da resistência, porém, em outros casos, misturas que ultrapassaram o tempo de 4 horas apresentaram uma queda brusca de resistência.

## 2.5 RESISTENCIA A COMPRESSÃO SIMPLES

Ensaio de resistência à compressão simples têm sido utilizados na maioria dos programas experimentais relatados na literatura quando se deseja verificar a efetividade de aditivos bem como analisar aspectos relativos à importância de fatores influentes sobre a resistência de misturas solo-aditivo. O ensaio é de simples e rápida execução, baixo custo, confiável e amplamente difundido no meio técnico de acordo com Sachetti *et al.* (2009).

Para a mistura solo-cal, Lopes Junior (2007) afirma que a quantidade de cal influi diretamente na resistência à compressão simples, e mesmo pequenas adições de cal são suficientes para gerar ganhos de resistência.

No entanto, segundo Ingles e Metcalf (1972), geralmente, a resistência a compressão simples aumenta linearmente com a quantidade de cal até certo nível, usualmente 8% para solos argilosos. A partir desse ponto a taxa de acréscimo de resistência diminui com a quantidade de cal, devido às misturas solo-cal apresentarem uma cimentação lenta e que depende do tipo de solo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 SOLO

O solo trabalhado é proveniente das margens da BR-101 nas proximidades do município de Silva Jardim no estado do Rio de Janeiro. Na localidade, ele já vinha sendo utilizado em misturas solo-cal para o melhoramento de camadas inferiores do pavimento e essa foi a justificativa da escolha do material. A figura 6, apresenta a jazida do solo natural estudado.

Figura 6 - Jazida do Solo no município de Silva Jardim



(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

O material foi armazenado em uma *bag* para que suas propriedades, dentro do possível, se mantivessem inalteradas, mesmo considerando condições climáticas adversas. Após o transporte o solo protegido foi disposto no LAPAV. A figura 7 mostra o descarregamento e armazenamento no material no LAPAV.

Figura 7 - Solo sendo descarregado e disposto no LAPAV



(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

Para um melhor resultado, o solo foi sempre trabalhado em condições naturais, respeitando dessa forma os limites de temperatura de secagem, sendo preponderantemente seco em temperatura ambiente. Seu destorroamento visou a não quebra dos grãos e para potencializar os resultados, a homogeneização seguiu as normas da NBR 6457 (ABNT, 1986a) após esse preparo, o solo passou pelo processo de quarteamento buscando o equilíbrio real da situação de campo. A figura 8 mostra o solo em condições naturais, pronto para a secagem.

Figura 8 - Solo em condições naturais



(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

### 3.1.1 Características do solo

Uma vez que a modificação química de um solo não depende somente do aditivo utilizado para o processo, e sim das propriedades das partículas que compõem o solo, uma minuciosa análise destas propriedades é fundamental para a escolha das hipóteses a serem testadas, bem como, para interpretar os resultados finais dos ensaios.

Dessa forma, os dados de caracterização do solo, foram retirados da pesquisa desenvolvida por Kleinert (tese em andamento). Os ensaios seguiram normatização nacional, de forma que para o ensaio de granulometria empregou-se a NBR 7181, (ABNT, 1984b), para a massa específica real dos grãos seguiu-se NBR 6508, (ABNT 1984a), o limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP) seguiram respectivamente a NBR 6459 (ABNT 1984a) e NBR 7180 (ABNT 1984d). O resultado da caracterização do solo permitiu a elaboração da tabela 1 com a classificação do solo.

Tabela 1 – Características do solo

	<b>Propriedade</b>	<b>Solo</b>
	Massa específica real dos grãos g/cm <sup>3</sup>	2,675
<b>Granulometria</b>	Argila (%)	14,00
	Silte (%)	37,00
	Areia fina (%)	8,00
	Areia média (%)	12,60
	Areia grossa (%)	26,30
	Pedregulho (%)	2,10
	Classificação NBR 6502 (ABNT,1995)	Areia Siltosa
<b>Plasticidade</b>	Limite de Liquidez - LL (%)	47,00
	Limite de Plasticidade - LP (%)	30,00
	Índice de plasticidade - IP (%)	17,00
	Classificação Burmister (1949 apud DAS, 2007)	Plasticidade Média
<b>Classificação</b>	AASHTO	A-7-5
	Índice de Grupo - IG	7
	SUCS (sigla)	SM-ML
	SUCS (nomenclatura)	Silte arenoso de baixa compressibilidade

(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

O conhecimento da composição química do solo trabalhado se mostra uma importante ferramenta de comparação para estudos futuros, de maneira que seja possível assim, chegar-se a conclusões sobre a relevância de algumas propriedades que compõem o solo na resistência das misturas. Dessa forma, retirou-se os dados de Kleinert (tese em andamento) e foi possível elaborar a tabela 2 com a composição química do solo utilizado.

Tabela 2 - Composição química do solo

<b>Composição Química</b>	
Argila (%)	46,00
pH (H <sub>2</sub> O)	5,10
Índice SMP	6,60
P (mg/dm <sup>3</sup> )	0,20
K (mg/dm <sup>3</sup> )	6,00
Matéria Orgânica (%)	0,50
Al trocável	1,20
Ca trocável	0,20
Mg trocável	0,20
Al + H (cmolc/dm <sup>3</sup> )	2,20
CTC (cmolc/dm <sup>3</sup> )	2,61
Saturação por bases (%)	16,00
Saturação por alumínio(%)	74,20
Relação Ca/Mg	1,00
Relação Ca/K	13,00
Relação Mg/K	13,00
S (mg/dm <sup>3</sup> )	71,00
Zn (mg/dm <sup>3</sup> )	0,20
Cu (mg/dm <sup>3</sup> )	0,20
B (mg/dm <sup>3</sup> )	0,10
Mn (mg/dm <sup>3</sup> )	1,00

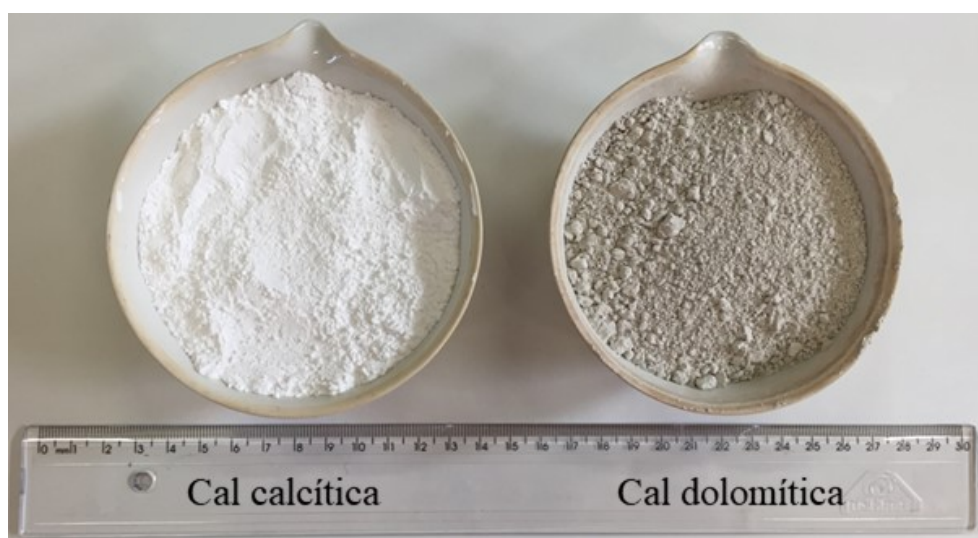
(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

O pH do solo aponta para um solo extremamente ácido, segundo Freire et al. (2013). O autor ainda classifica solos em relação ao fósforo (P) e potássio (K) de acordo com a escala: baixo, médio, alto. Para o solo em questão observa-se um nível baixo de fósforo e potássio. Ainda, segundo Kleinert (tese em andamento) é possível classificar o solo em questão como um Argissolo Vermelho Amarelo.

## 3.2 CAL

Para o estudo, foram escolhidas, dois tipos de cales hidratadas, que é a forma mais utilizada em campo, sendo esses a cal calcítica e a cal dolomítica. A primeira proveniente do estado de Minas Gerais classificada pelo fabricante como de alto cálcio, a segunda, por outro lado, é original do Rio Grande do Sul com altos teores de cálcio e magnésio. As diferenças supracitadas podem ser conferidas na figura 9, onde a coloração mais acinzentada da cal dolomítica é resultado da presença acentuada de magnésio e possível presença de impurezas no aditivo.

Figura 9 - Cales



(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

### 3.2.1 Caracterização das cales

A composição química de cada aditivo é de extrema importância para a melhor compreensão dos resultados, embora não exista uma norma que norteie esse processo, para o tratamento de solos, optou-se pela NBR 7175 (ABNT, 2003) que se refere ao uso de cal em argamassas. A tabela 3 apresenta a composição química das cales empregadas no estudo, conforme Kleinert (tese em andamento).



Tabela 3 - Composição química das cales

Parâmetro	Dolomítica (%)	Calcítica (%)
Mgo	31,1	0,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,41	0,05
SiO <sub>2</sub>	3,02	0,12
Ca total	45,22	73,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,29	0,18
CO <sub>2</sub>	2,88	2,42
S	0,011	0,032
Na <sub>2</sub> O	0,107	-
K <sub>2</sub> O	0,375	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,025	0,059
SrO	0,029	0,391
ZrO <sub>2</sub>	0,005	0,045
MnO	0,088	-
ZnO	0,007	-
TiO <sub>2</sub>	0,048	-
BaO	0,031	-
Cl	0,014	0,015
Perda por combustão	17,99	25,22

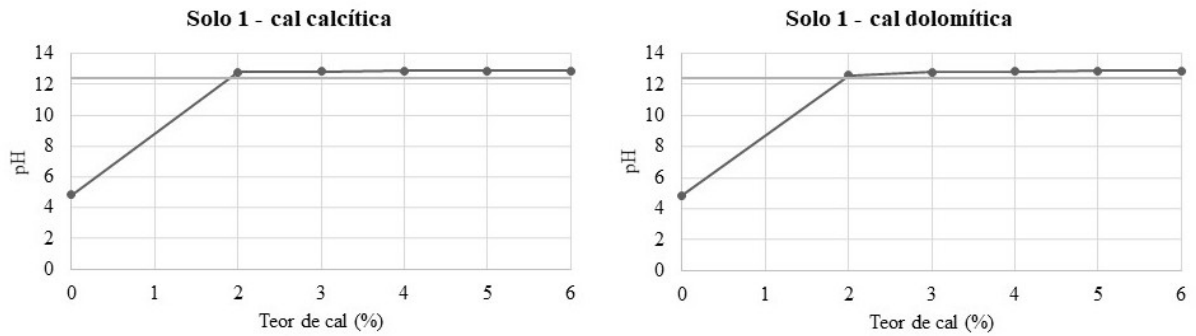
(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

### 3.2.2 Teor das cales

Vários são os métodos utilizados para a dosagem de cal suficiente para proporcionar a alteração efetiva das propriedades de um solo. Para o estudo em questão, optou-se pelo método baseado no pH e na plasticidade.

O método do pH consiste na determinação do menor teor de cal necessário para que a mistura solo-cal atinja o valor de pH de 12,4. A determinação do valor se justifica, pois, o mesmo garante as condições ideais para que ocorram as reações de estabilização da mistura. O ensaio foi feito no Laboratório de via úmida da mineração BELOCAL, fornecedora da cal calcítica, e seguiu a Norma D6276 (ASTM, 2006) baseada no trabalho de Eades & Grim (1966). Como resultado percebeu-se que com 2% de cal, o solo já atinge o valor necessário para a estabilização. A figura 10 apresenta os valores do método do pH.

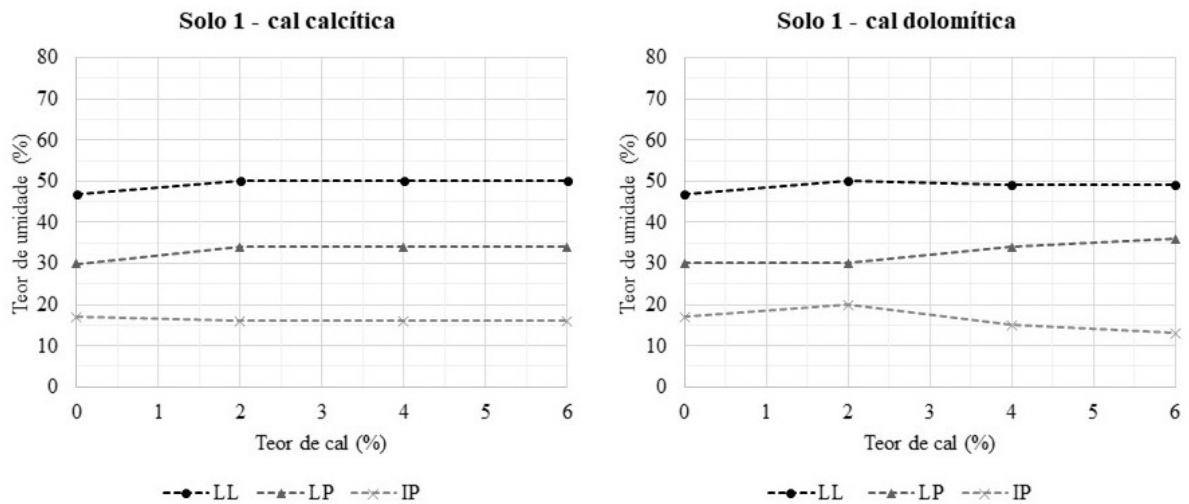
Figura 10 - Método do pHs



(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

O método da plasticidade, por sua vez, busca encontrar o teor necessário de cal para a redução da plasticidade da amostra e em consequência o melhoramento de sua trabalhabilidade. Para tanto, são realizados ensaios de limite de liquidez (ABNT, 1984c) e limite de plasticidade (ABNT, 1984d) em amostras com diferentes teores de cal. Com o resultado percebeu-se não haver considerável alteração da plasticidade nas misturas. Na figura 11 são apresentados os valores referentes ao método da plasticidade.

Figura 11 - Método da Plasticidade



(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

Com a análise dos resultados, optou-se por levar em consideração apenas o método do pH. No entanto, mesmo que pelo método o teor de 2% já apresentasse condições de estabilidade da mistura algumas referências apontam para uma exigência mínima de 3%. Dessa forma, optou-se por testes com valores de 3 e 5% que levam em conta os valores de ensaios e referências, mas também apresentam fundamentação econômica.

### 3.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação tem por finalidade determinar o teor de umidade ótimo e a massa específica aparente seca máxima do solo natural e das misturas que compõem as hipóteses. O ensaio seguiu a NBR 7182 (ABNT, 1986b) e forneceu os valores que foram empregados na moldagem dos corpos de prova da resistência a compressão simples. A variação da energia, implica na variação dos resultados, portanto as curvas serão divididas conforme a energia (normal e modificada).

A preparação em um primeiro momento contou com o devido destorroamento e secagem do material, em seguida, o solo destorroado era armazenamento em bombonas. Dessas bombonas, eram tiradas 3 cápsulas que posteriormente foram colocadas em uma estufa de 110°C a fim de fornecer a umidade exata que o solo se encontrava. No caso das hipóteses da energia normal, preparavam-se 24 horas antes da compactação, sacos do solo com adição de certa quantidade de água e deixava-se em uma câmara durante esse período de tempo para a homogeneização do material. No caso das misturas de solo-cal, a fim de que o material tivesse um princípio de reações, uma hora antes da compactação era homogeneizado solo e aditivo. A figura 12 apresenta a preparação do solo com a adição da cal.

Figura 12 - Preparação do material antes da compactação



(fonte: elaborado pelo autor)

Após a compactação era retirado do interior de cada corpo de prova, pequenas amostras, que voltavam para a estufa a fim de conferir a umidade com que se compactou o ponto em questão,

para que na sequência esse valor fosse empregado na curva de compactação. Na figura 13 é possível observar a retirada das amostras.

Figura 13 - Retirada da amostra de umidade após a compactação



(fonte: elaborado pelo autor)

As curvas foram elaboradas com o valor de umidade obtido da amostra compactada, respeitando, porém, um teor de variação de aproximadamente 2%. O gráfico contém no mínimo 5 pontos e entre eles pode-se observar a massa específica aparente seca máxima da mistura compactada.

### **3.3.1 Proctor Normal**

Para o emprego da energia de compactação Proctor Normal, utilizou-se o cilindro e o soquete de menores dimensões, conforme a NBR 7182 (ABNT, 1986b). Para essa energia, após realizada a curva do solo natural constatou-se a necessidade de uma umidade de homogeneização e para tanto, 24 horas antes do ensaio foi adicionado uma quantidade de água de forma que o teor de umidade do solo atingisse o valor de 10%

### **3.3.1 Proctor Modificada**

Para o emprego da energia de compactação Proctor Modificada, assim como para Proctor Normal, a norma de referência empregada foi a NBR 7182 (ABNT, 1986b), porém o cilindro e o soquete utilizado foram os de maiores dimensões. Para essa energia, após realizada a curva do solo natural e constatar-se que a umidade ótima baixa, e diferentemente da Proctor Normal,

não se mostrou necessária uma umidade de homogeneização. A figura 14 mostra a compactação sendo realizada na energia Modificada.

Figura 14 - Compactação do Corpo de Prova



(fonte: elaborado pelo autor)

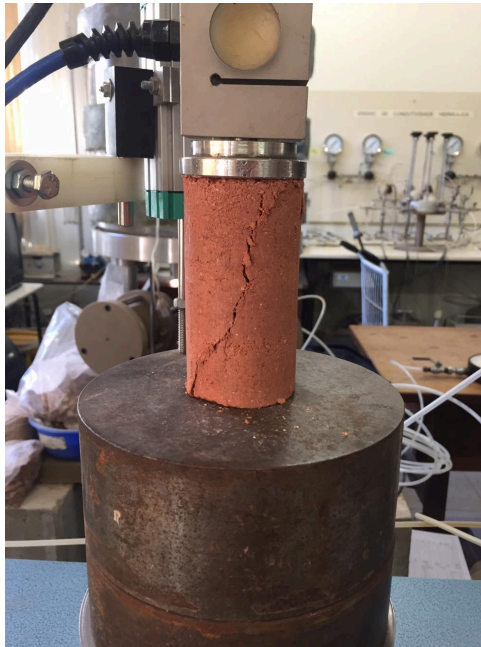
### 3.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Em posse dos teores de umidade ótimo e respectivas massas específicas aparentes secas máximas, partiu-se para os ensaios de resistência à compressão simples, segundo o “Procedimento A” da norma americana D5102 (ASTM, 2009). A fim de facilitar o desmolde foram utilizados moldes tripartidos 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura. As camadas que compuseram o corpo de prova foram 3 e elas estavam dispostas de forma idêntica seguindo o cálculo de moldagem.

O ensaio conta com o auxílio de uma prensa conectada a um computador, que por intermédio de um *software* que proporciona uma taxa de aplicação de carga até que o corpo de prova

ensaiado rompa. A figura 15 apresenta um corpo de prova no momento do rompimento, ainda conectado a prensa.

Figura 15 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples

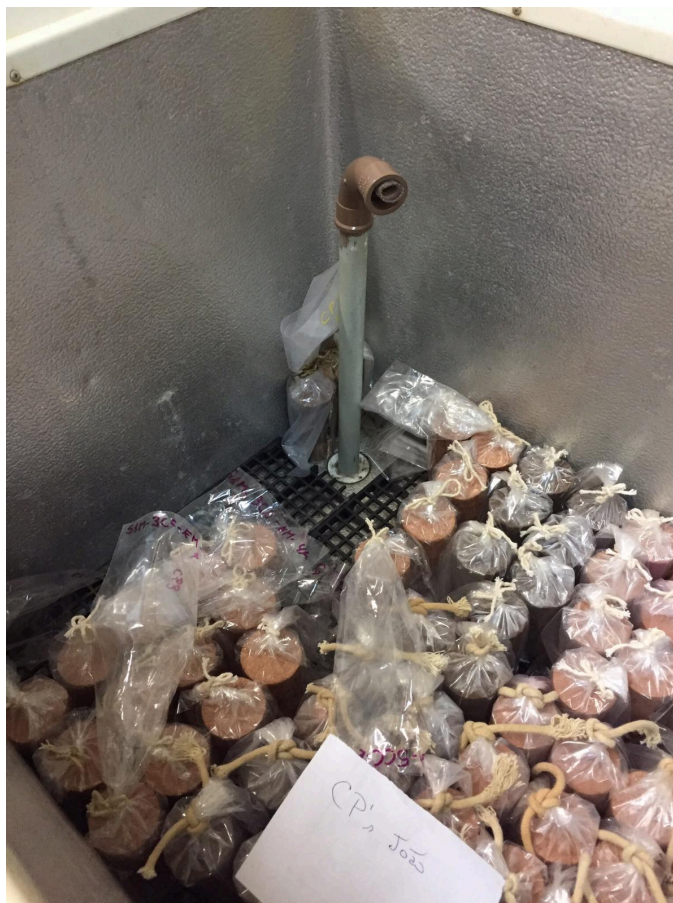


(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.4.1 Tempo de cura

O tempo de cura foi baseado na norma americana D5102 (ASTM, 2009), que sugere tempos de cura de 7, 28 e 90 dias para misturas de solo-cal. Bibliograficamente, a ideia é reforçada por Ingles e Metcalf (1972) apud Lopes (2007) que constataram que aos 7 dias os solos tratados com cal já apresentam ganho de resistência, e embora nesse tempo a mistura ainda não tenha apresentado o seu potencial máximo, como o estudo busca apenas uma comparação de influências, julgou-se satisfatório esse período. Além disso, optou-se pela cura úmida onde cada corpo de prova era disposto dentro de um saco plástico e armazenado em uma câmara com temperatura entre 21 e 25°C e umidade relativa do ar acima de 95%. Na figura 16, é possível observar a câmara com alguns corpos de prova e o mecanismo que mantinha a alta umidade do ar.

Figura 16 - Câmara úmida



(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.4.2 Demora na compactação

A demora na compactação apresentou-se como uma boa hipótese a ser testada, uma vez que, em obras, o tempo de compactação varia de acordo com as mais diversas situações. Podendo em alguns casos ser mais longo, devido a algum imprevisto, ou mais curto motivado pela urgência dos prazos.

Na bibliografia, em artigo publicado por Trindade (2005), para modificações químicas do solo, na grande maioria dos casos quanto maior o tempo de atraso, maior a resistência adquirida pela mistura. Porém, nem sempre essa regra se confirma, e no mesmo artigo foi observado que em outros casos misturas que ultrapassaram a demora de 4 horas apresentaram queda de resistência.

Para tanto optou-se por criar hipóteses de 1 hora, 4 horas e 24 horas de atraso de compactação. Com isso, foi respeitado o tempo previsto em referências bibliográficas sem desconsiderar situações plausíveis de campo.

### 3.4.2 Moldagem dos corpos de prova

Embora os dados do ensaio de compactação tenham sido moldados com demora na compactação de 1 hora, independente da hipótese de atraso, os valores do cálculo de moldagem empregados foram os extraídos da respectiva curva. Dessa forma, encontrou-se a quantidade de mistura por camada do corpo de prova. Após cada moldagem, repetia-se o ciclo de limpar e untar o molde. Algumas diferenças de processo, no entanto, foram percebidas entre as diferentes energias.

. Para a moldagem dos corpos de prova testados com energia Modificada, observou-se que não era possível chegar a densidade ótima com a utilização do soquete disponível no laboratório. A solução encontrada foi a utilização de uma prensa que fornecia um carregamento monotônico capaz de fornecer a energia necessária para moldagem. A figura 17 apresenta a moldagem de um corpo de prova na energia modificada, com o auxílio de uma prensa.

Figura 17 - Moldagem energia modificada



(fonte: elaborado pelo autor)



### 3.5 HIPÓTESES ENSAIADAS

As hipóteses testadas para o solo foram 24, contemplando assim, todas as variações previstas. Para cada uma das hipóteses foram moldados 3 corpos de prova, gerando um total de 72 amostras. A tabela 4 apresenta cada uma das variações do estudo.

Tabela 4 - Hipóteses testadas

Ensaio	Cal	Teor de cal (%)	Demora (horas)	Energia de compactação
1	calcítica	3	1	Normal
2	calcítica	5	1	Normal
3	dolomítica	3	1	Normal
4	dolomítica	5	1	Normal
5	calcítica	3	4	Normal
6	calcítica	5	4	Normal
7	dolomítica	3	4	Normal
8	dolomítica	5	4	Normal
9	calcítica	3	24	Normal
10	calcítica	5	24	Normal
11	dolomítica	3	24	Normal
12	dolomítica	5	24	Normal
13	calcítica	3	1	Modificada
14	calcítica	5	1	Modificada
15	dolomítica	3	1	Modificada
16	dolomítica	5	1	Modificada
17	calcítica	3	4	Modificada
18	calcítica	5	4	Modificada
19	dolomítica	3	4	Modificada
20	dolomítica	5	4	Modificada
21	calcítica	3	24	Modificada
22	calcítica	5	24	Modificada
23	dolomítica	3	24	Modificada
24	dolomítica	5	24	Modificada

(fonte: elaborado pelo autor)

### 3.6 ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise estatística com o auxílio do *software Minitab*, foi realizada no intuito de avaliar as hipóteses testadas quanto a sua influência na resistência a compressão simples. O programa conta com uma série de ferramentas que facilita o entendimento.

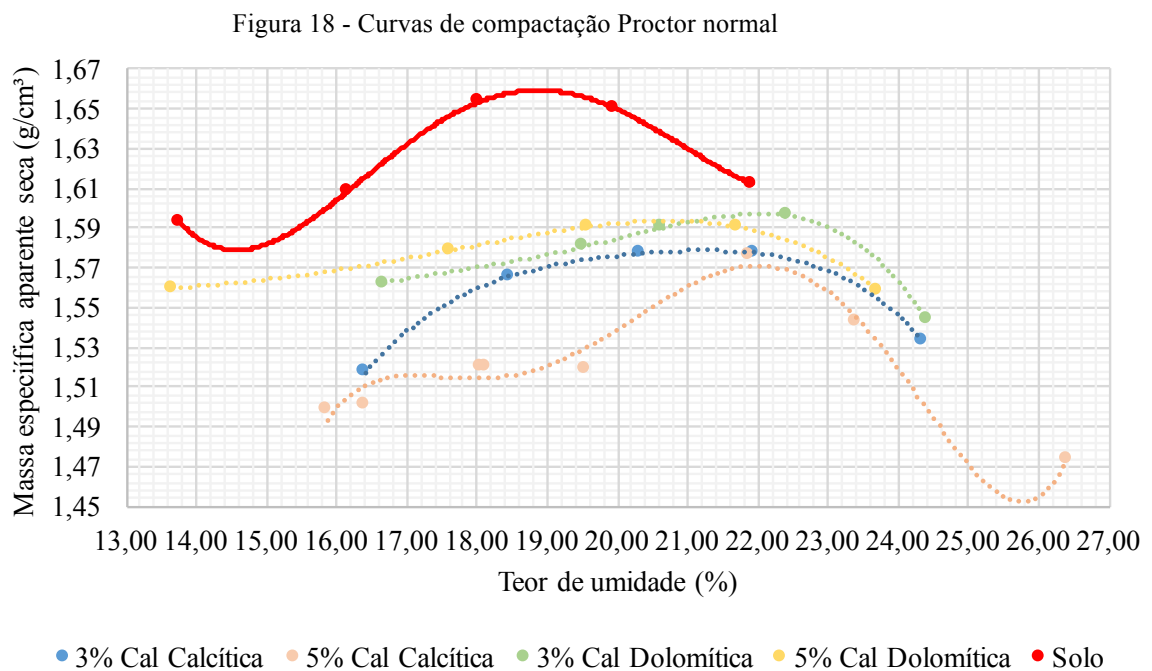
Em uma primeira fase, os resultados foram filtrados, de maneira que valores com diferenças superiores a 10% da média foram descartados. As resistências que se encontravam dentro do intervalo de aceitação eram processadas no programa, com isso o *software* determina através de uma análise de variância, a influência dos fatores testados no comportamento da mistura.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

#### 4.1.1 Energia Proctor Normal

Ao analisar-se as curvas dessa energia de compactação, percebe-se um efeito significativo da adição da cal ao solo natural. A massa específica aparente seca máxima cai significativamente se comparada a qualquer hipótese de mistura, o teor de umidade ótimo, por outro lado, eleva seus níveis pela ação do aditivo. A figura 18 apresenta as curvas de compactação da energia Proctor Normal.



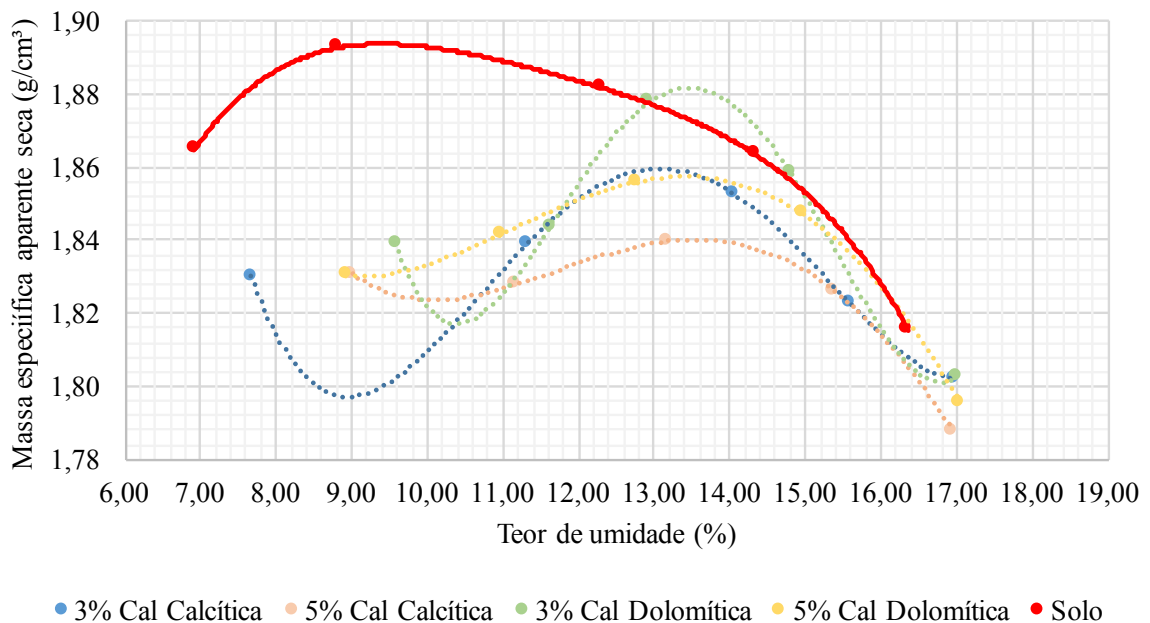
(fonte: KLEINERT, tese em andamento)

Além das observações a cima citadas, ao comparar as hipóteses entre si, observa-se que medida que se adiciona a cal, a massa específica da mistura diminui, enquanto a umidade ideal de compactação eleva seu valor. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato de que ambas as cales apresentam peso específico menor que o solo natural, e por sua vez, essa quantidade de aditivo demanda uma maior presença de água.

### 4.1.2 Energia Proctor Modificada

A curva de compactação na energia Proctor Modificada, assim como na Proctor Normal, deixa claro os efeitos da cal. Para esse caso, no entanto, as variações são um pouco menos representativas. A massa específica aparente seca máxima do solo natural apresenta leve diminuição se comparada as demais misturas. O teor de umidade ótimo, em contrapartida, aumenta seu valor em aproximadamente 50%. Os valores podem ser observados na figura 19 que ilustra as curvas de compactação dessa energia.

Figura 19 - Curvas de compactação Proctor modificada



(fonte: elaborado pelo autor)

Outra diferença entre as curvas das respectivas energias de compactação, é que para o caso da energia Modificada, a massa específica é consideravelmente maior, tanto para o solo natural quanto para as misturas. Isso se justifica, pois o processo de compactação com um soquete mais pesado associado a um maior número de golpes, faz com que a densificação da mistura atinja maiores níveis.

O teor de umidade ótimo também apresentou uma queda em comparação à energia Normal. As diferenças entre as energias e as hipóteses testadas provocaram alterações significativas no solo natural. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos de acordo com a hipótese.

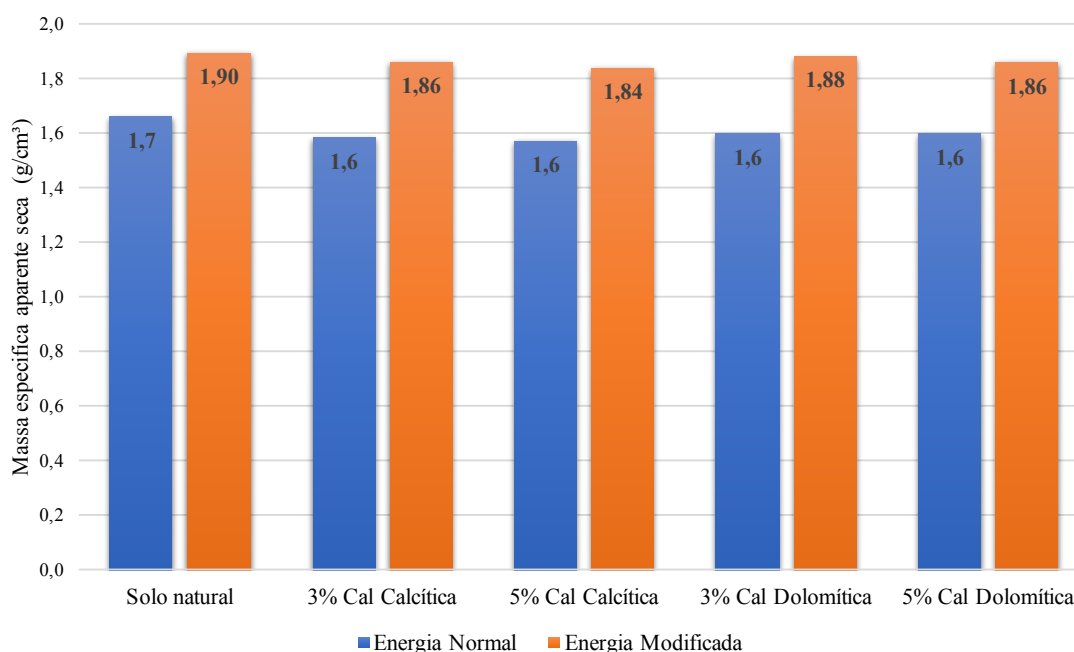
Tabela 5 - Resultados curva de compactação

<b>Hipótese</b>		$\gamma_{sm\acute{a}x}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\omega_{\acute{o}t}$ (%)
<b>Energia Normal</b>	Solo natural	1,660	18,92
	3% Cal Calcítica	1,580	21,20
	5% Cal Calcítica	1,572	22,00
	3% Cal Dolomítica	1,598	21,80
	5% Cal Dolomítica	1,595	20,80
<b>Energia Modificada</b>	Solo natural	1,895	9,60
	3% Cal Calcítica	1,860	13,20
	5% Cal Calcítica	1,840	13,50
	3% Cal Dolomítica	1,882	13,40
	5% Cal Dolomítica	1,857	13,40

(fonte: elaborado pelo autor)

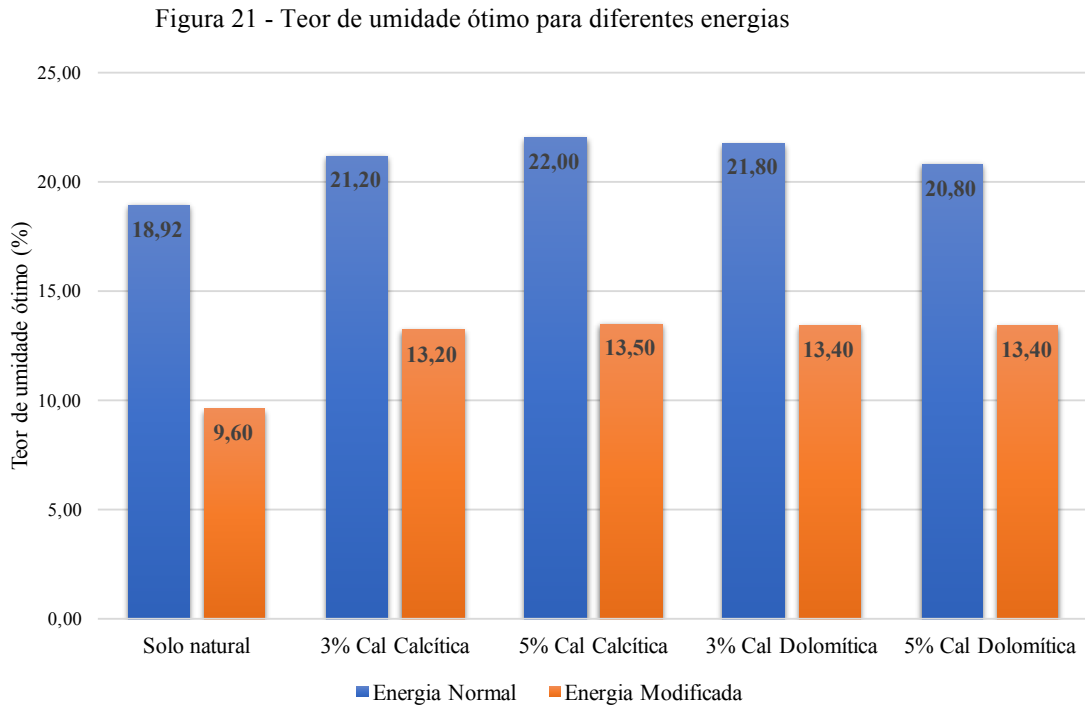
Para fins comparativos, foi desenvolvido o gráfico da figura 20, que facilita a visualização do comportamento das misturas no que diz respeito a massa específica conforme energia de compactação. Observa-se na figura, que a variação entre as diferentes cales e teores é pequena se comparada a variação conforme a energia de compactação.

Figura 20 - Massa específica máxima para diferentes energias



(fonte: elaborado pelo autor)

Para o teor de umidade, o comportamento é similar, porém os teores diminuem com o aumento da energia de compactação. A figura 21 ilustra bem esse comportamento.



(fonte: elaborado pelo autor)

## 4.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

### 4.2.1 Efeito da energia de compactação

As energias de compactação, independente do tipo, apresentaram valores consistentes no objetivo de estabilização do solo. Com a finalidade de ilustrar o ganho proporcionado pela energia de compactação após um período de 7 dias de cura úmida, organizou-se a tabela 6. Os valores da tabela dizem respeito a média de resistência de 9 corpos de prova por hipótese de mistura e 3 para o solo natural. Além disso, o efeito da energia de compactação foi avaliado isoladamente, dessa forma, para as médias não foi levado em conta a influência de diferentes demoras na compactação.

Tabela 6 - RCS por energia de compactação

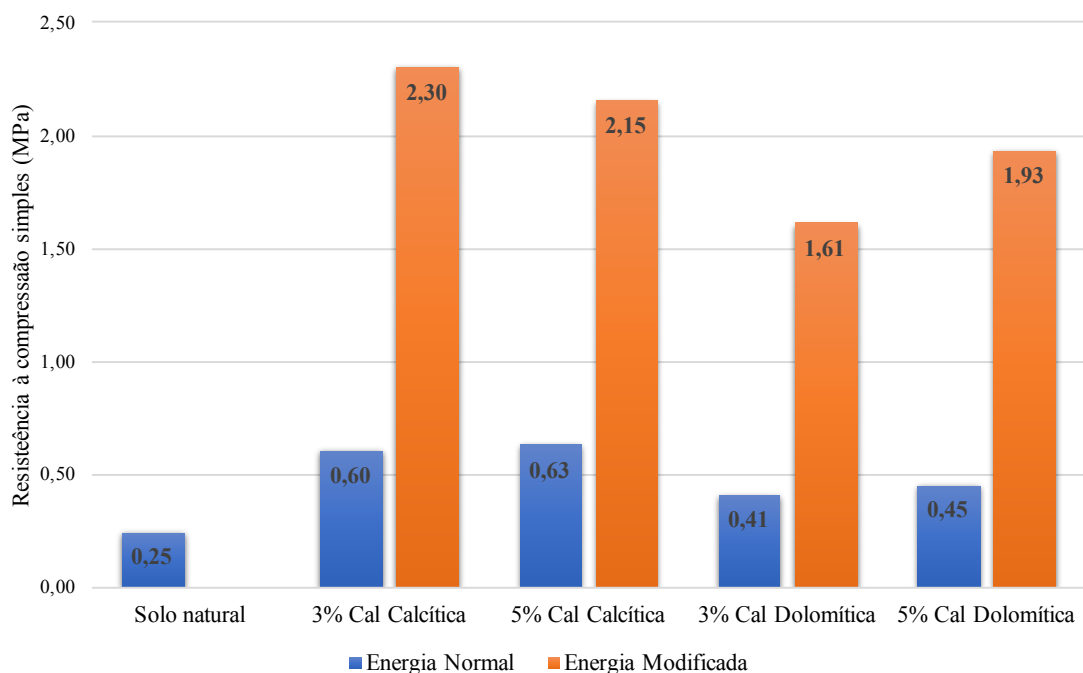
	Hipótese	RCS (Mpa)
<b>Energia Normal</b>	Solo Natural	0,245
	3% Cal Calcítica	0,601
	5% Cal Calcítica	0,626
	3% Cal Dolomítica	0,406
	5% Cal Dolomítica	0,452
<b>Energia Modificada</b>	3% Cal Calcítica	2,298
	5% Cal Calcítica	2,154
	3% Cal Dolomítica	1,610
	5% Cal Dolomítica	1,933

(fonte: elaborado pelo autor)

Ao analisar a tabela, verifica-se que os ganhos de resistência na compactação com energia modificada foram mais significativos, elevando os valores em alguns casos para níveis superiores a 2 MPa. A energia normal por outro lado, embora não tenha apresentado todo esse ganho, ainda assim apresentou significativa modificação das propriedades de resistência.

Para tornar ainda mais perceptível a diferença de ganho de resistência da energia Modificada em relação à energia Normal, organizou-se o gráfico de barras da figura 22.

Figura 22 - Comparação de RCS energia normal e modificada

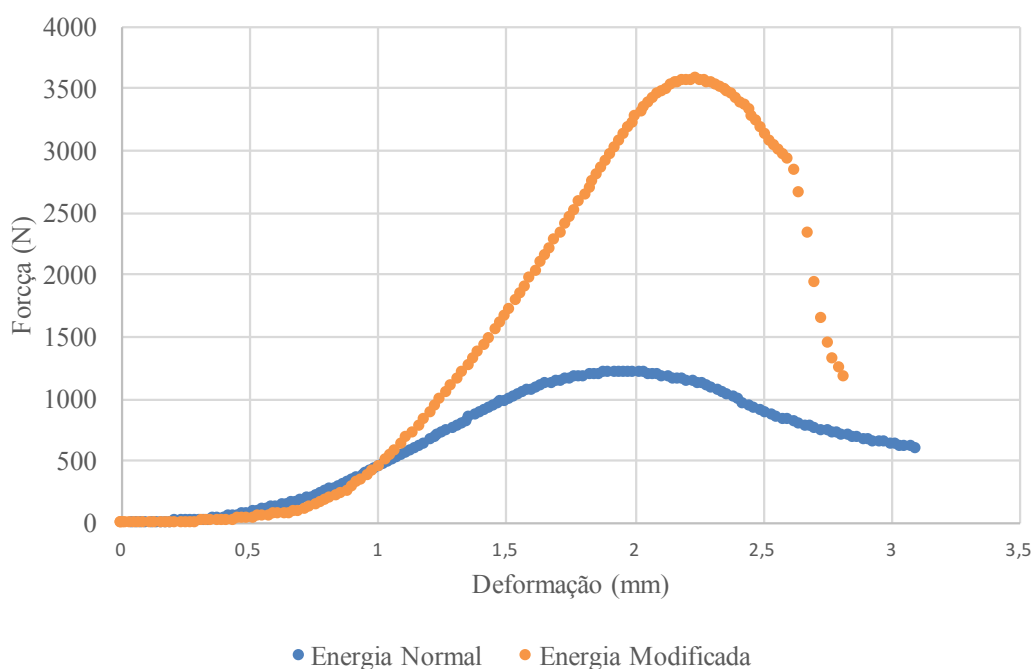


(fonte: elaborado pelo autor)

Na figura fica claro uma influência do tipo e do teor de cal, sendo que para a Proctor Modificada a mistura com maior resistência foi de 3% de cal calcítica, fato que pode ser justificado devido ao baixo teor de umidade da mistura, de maneira que para 5% seja gerado um excesso de aditivo que por falta de água não reage. Para a energia Normal a hipótese de 5% de cal calcítica foi a que apresentou maiores níveis.

Além dos resultados de resistência, um comportamento de ruptura diferente foi observado entre as energias. Enquanto as misturas compactadas na energia Proctor Normal apresentam um comportamento plástico, os solos que passaram por um processo de compactação na energia Proctor Modificada, apresentam uma curva de ruptura típica de um corpo rígido. A figura 23 foi elaborada para exemplificar esse comportamento, para isso utilizou-se para cada energia uma amostra de 5 % de cal calcítica compactada com uma demora de 24 horas.

Figura 23 - Curva de ruptura de acordo com a energia de compactação



(fonte: elaborado pelo autor)

#### 4.2.2 Demora na Compactação

A tabela 7 foi elaborada com a média de 3 corpos de prova por hipótese respeitando os tempos, teores e tipos de cales previamente estipulados.



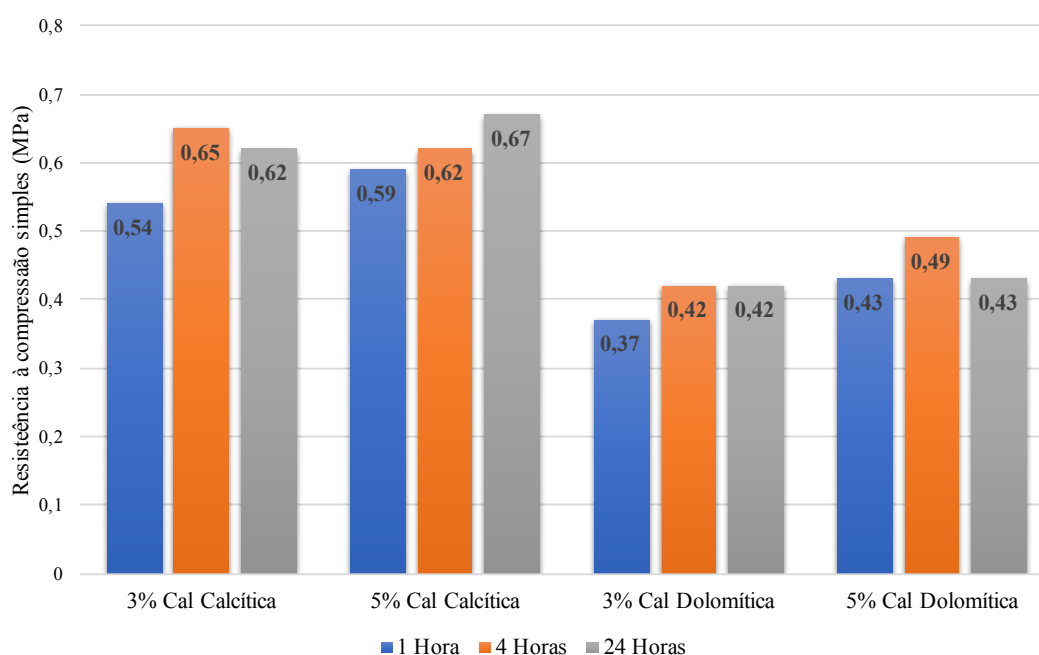
Tabela 7 - Resultados RCS para diferentes demoras de compactação

Demora (horas)		RCS (MPa)		
		1	4	24
Energia Normal	3% Cal Calcítica	0,54	0,65	0,62
	5% Cal Calcítica	0,59	0,62	0,67
	3% Cal Dolomítica	0,37	0,42	0,42
	5% Cal Dolomítica	0,43	0,49	0,43
Energia Modificada	3% Cal Calcítica	2,25	2,12	2,52
	5% Cal Calcítica	2,08	2,21	2,18
	3% Cal Dolomítica	1,44	1,84	1,55
	5% Cal Dolomítica	1,78	2,13	1,88

(fonte: elaborado pelo autor)

Ao analisar a tabela percebeu-se um indicativo de que para tempos de 4 e 24 horas o ganho de resistência é maior em relação ao tempo de uma hora. No intuito de uma melhor observação, foram desenvolvidos 2 gráficos separando as energias de compactação, que apresentam diferenças significativas entre elas, e isolando assim a demora na compactação. A figura 24 apresenta o gráfico de barras das misturas compactadas com energia Normal respeitando as respectivas hipóteses e tempo de acordo com suas resistências médias.

Figura 24 - Demora na compactação energia Normal

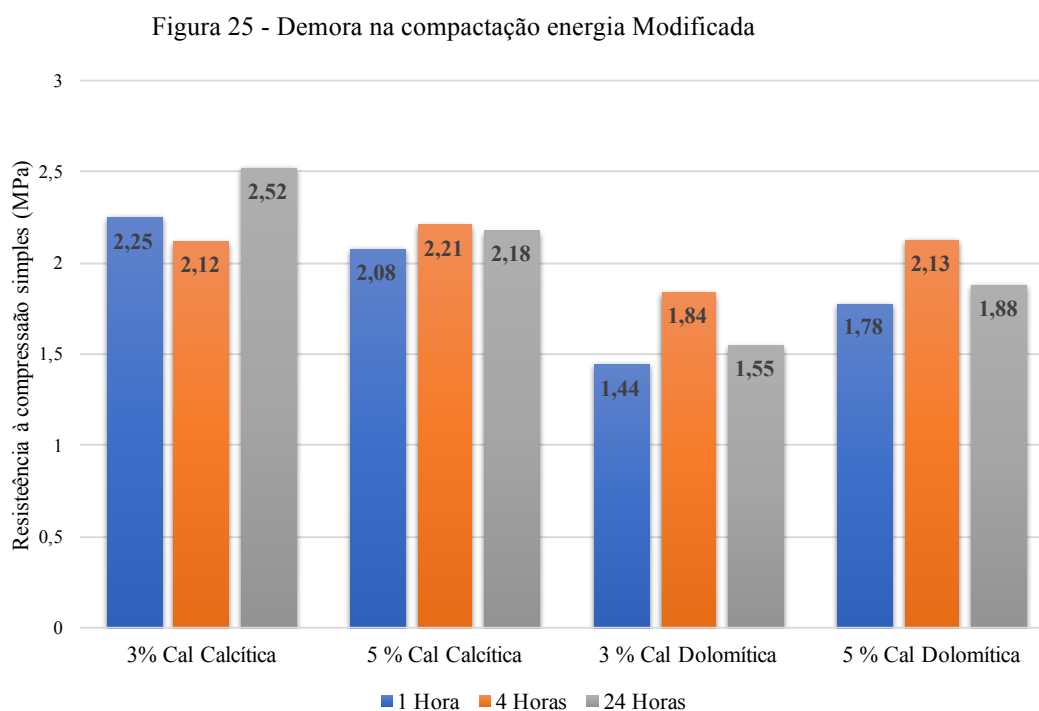


(fonte: elaborado pelo autor)

Com o gráfico, foi possível observar que para a energia Proctor Normal há um maior ganho médio de resistência nos tempos de 4 e 24 horas. Para a cal dolomítica com teor de 5%, porém, percebe-se um comportamento mais específico, de maneira que para esse aditivo o tempo de 4 horas é o que apresenta melhores resultados. Por outro lado, para a cal calcítica não se observa esse padrão, assim sendo, para um teor de 3% o tempo ótimo é o de 4 horas, enquanto para 5% os maiores níveis de resistência são obtidos com uma demora de 24 horas.

Além disso, mesmo quando se avalia a demora na compactação, nota-se a influência do tipo e do teor da cal, sendo que para essa energia, os melhores resultados foram observados para cal calcítica em relação à dolomítica.

Sabendo dos efeitos produzidos pelas diferentes energias, plotou-se o mesmo gráfico de barras anterior, porém, considerando o processo de compactação mais intenso. A figura 25 ilustra os resultados da demora de compactação para a energia Proctor Modificada.



(fonte: elaborado pelo autor)

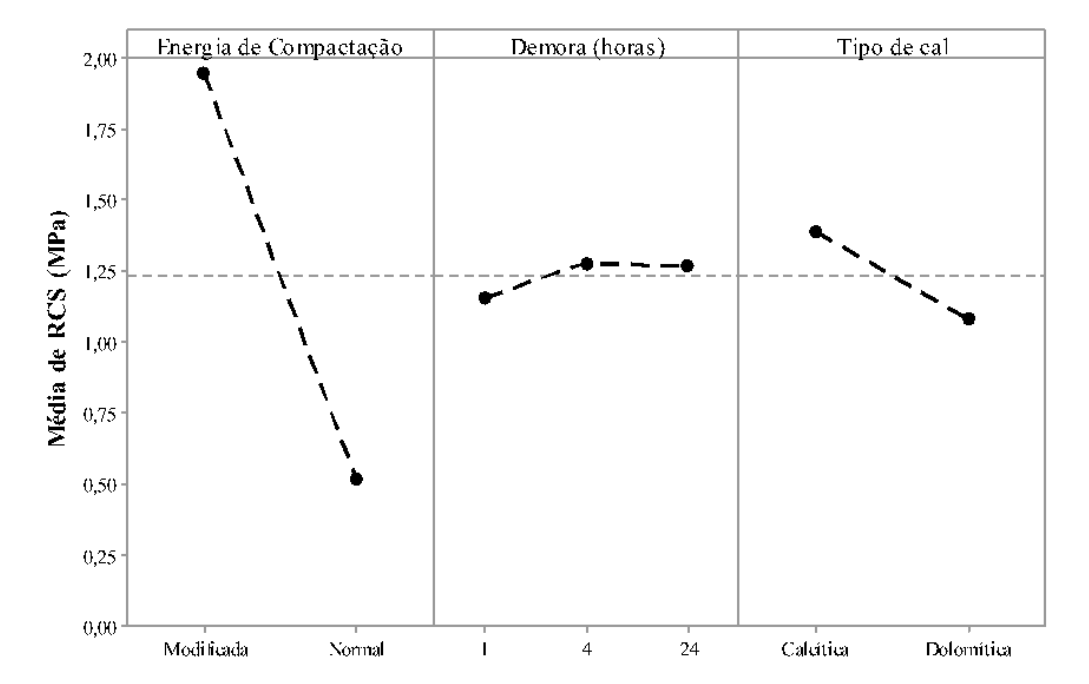
Embora com valores mais expressivos, para essa energia, os maiores ganhos médio de resistência continuam nos tempos de 4 e 24 horas. Para a cal dolomítica, o mesmo padrão percebido na energia Normal é observado na Modificada, de maneira que o tempo de 4 horas continua apresentando os maiores valores de resistência. No caso da cal calcítica, porém, o

comportamento é um pouco diferente, misturas com teor de 3% apresentam os melhores resultados com a demora de 24 horas, enquanto para 5%, com uma sutil diferença, os maiores níveis são atingidos com um tempo de 4 horas.

### 4.3 ANÁLISE DOS EFEITOS

Para chegar-se a uma conclusão mais confiável sobre a real influência dos fatores testados na resistência a compressão simples, utilizou-se o *software* Minitab. Com ele, realizou-se uma análise de variância *ANOVA*, onde a inclinação das retas é diretamente proporcional a significância da variável analisada. A figura 26 apresenta os resultados obtidos com o programa.

Figura 26 - Relevância das variáveis analisadas



(fonte: elaborado pelo autor)

Observa-se que a energia de compactação é a variável mais significativa sendo ela a maior responsável pelo ganho de resistência do solo. A energia modificada é a que proporciona melhores resultados.

A demora na compactação apresenta certa relevância, de maneira que, para o tempo de 1 hora o ganho de estabilidade é o menor dentre as hipóteses testadas. Ainda é possível observar que embora praticamente insignificante a demora na compactação de 4 horas apresenta maiores níveis de resistência se comparada ao tempo de 24 horas.

O tipo de cal, é em ordem de importância o segundo fator, sendo a cal calcítica a mais indicada para níveis mais altos de resistência. Os teores de cal não foram significativos, dessa maneira foram desconsiderados.

## 5 CONCLUSÕES

O estudo em questão permitiu que se chegasse a algumas conclusões sobre a influência dos processos não normatizados do método de estabilização de solos com a adição de cal. O resultado disso é diminuição de algumas incertezas construtivas e também um ganho de potencial dos insumos disponíveis em campo.

Sobre a energia de compactação concluiu-se que é o fator controlável que mais influencia no resultado final de resistência. Embora ensaiados corpos de prova com tempo de cura de 7 dias, para a energia Modificada, observa-se uma resistência acima de 2,2 MPa, no caso da cal calcítica. Embora as misturas de solo-cal ainda não estejam devidamente normatizadas, a título de comparação, segundo a NBR 12253 (ABNT,1992), solos tratados com cimento Portland podem ser utilizados em camadas de base desde que apresentem resistência a compressão simples superior a 2,1 MPa para um tempo de cura de 7 dias. Caso a norma valesse para a estabilização com cal, o solo do estudo quando tratado com cal calcítica poderia ser empregado até mesmo em camadas de base do pavimento.

Sobre a demora na compactação concluiu-se que para o tempo de 1 hora o ganho de resistência é inferior se comparado a 4 e 24 horas de atraso. Por outro lado, entre estes dois tempos, pouca diferença foi observada, de maneira que os melhores resultados foram obtidos no tempo de 4 horas, indo de encontro ao que consta no artigo de Trindade (2005). Além disso, foi observado que é possível alcançar o grau de compactação mesmo com diferentes demoras.

O tipo de cal, atrás apenas da energia de compactação, foi o fator que mais influenciou no potencial da mistura, sendo que a cal calcítica proporcionou melhores resultados. Dessa maneira, justificou algumas revisões bibliográficas, que citavam o maior número de óxido de cálcio no aditivo como fator essencial para melhores resultados das reações pozolânicas. A cal dolomítica, por sua vez, apresentou resultados não tão satisfatórios.

O teor de cal não apresentou significância, de maneira que para situações de campo, pode-se optar por uma quantidade menor do aditivo, reduzindo assim o custo do método. Para a energia Modificada é possível que essa baixa relevância se justifique no teor de umidade diminuto, de maneira que um excesso de cal não consegue reagir, devido a falta de água.

Além disso, novos estudos com diferentes solos tropicais podem trazer diferentes resultados complementando assim o estudo atual.

## REFERÊNCIAS

BOCK, A.L. **Efeitos da incorporação de cal hidratada em concretos asfálticos elaborados com ligante convencional e modificado.** 2012 p36

CARDOSO, F.B.F. **Propriedades e comportamento mecânico de solos do planalto central brasileiro.** Tese de doutorado. Universidade de Brasília. Faculdade de tecnologia. Departamento de Geotécnica, 2002

DALLA ROSA, A. **Estudo dos Parâmetros-Chave no Controle da Resistência de Misturas Solo-Cinza-Cal.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009

DIAMOND, S.; KINTER, E. B. **Mechanisms of Soil-Lime Stabilization.** Highway Research Record, v. 92, p. 83–102, 1965.

ELY, V. **Influência da energia de compactação na resistência e na rigidez de mistura reciclada com cimento e com elevado teor de fresado.** 2014. 57 p. Trabalho de diplomação (Engenharia Civil) – UFRGS, Porto Alegre.

HARTY, J. R.; THOMPSON, M. R. **Lime reactivity of tropical and subtropical soils.** Highway Research Record, v. 442, p. 102–112, 1973.

HILT, G. H.; DAVIDSON, D. T. **Lime Fixation in Clayey soils.** Highway Research Bulletin, n. 262, p. 20–32, 1960.

INGLES, O. G.; METCALF, J.B. **Soil Stabilization: principles and practices.** Sydney: Butterworths, 1972.

KLEINERT, T. R. **Obtenção de parâmetros para dimensionamento mecanístico de pavimento com camadas de solo-cal.** Tese em andamento com previsão de defesa para 2020. Tese (Doutorado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

LITTLE, D. et al. **Soil stabilization for roadways and airfields.** Report ESL-TR-86-19, Air Force Engineering and Services Center, Tyndall Air Force Base, Florida., v. 19, 1987.

LITTLE, D. N. **Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime.** McGregor: Lime Association of Texas, 1995.

LITTLE, D. N. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates - Volume 1:** Summary of findings. National Lime Association, 89 p., 1999.

LITTLE, D. N. **Evaluation of structural properties of lime stabilized soils and aggregates - Volume 3:** Mixture design and testing procedure for lime stabilized soils. National Lime Association, 16 p., 2000.

LOPES JUNIOR, L. S. **Parâmetros de Controle da Resistência Mecânica de Solos Tratados com Cal, Cimento e Rocha Basáltica Pulverizada**. 147p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – UFRGS, Porto Alegre, 2007.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado a pavimentação**. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRGS, Porto Alegre, 2004.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime-treated soil construction manual: lime stabilization & lime modification**. National Lime Association, n. Bulletin 326, 2004.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime treated soils save time & money**, 2005.

NATIONAL LIME ASSOCIATION. **Lime Terminology, Standards & Properties**. National Lime Association, p. 1–10, 2007.

NOGAMI, J.S. E VILLIBOR, D.F. (1981) **Uma Nova Classificação de Solos para Finalidades Rodoviárias**. In: Simpósio brasileiro de solos tropicais em engenharia, Rio de Janeiro. Anais. COPPE/UFRJ – CNPq - ABMS, Rio de Janeiro, p. 30-41.

NOGAMI, J.S. E VILLIBOR, D.F. (1994) **Identificação expedita dos grupos da classificação MCT para solos tropicais**. In: x congresso brasileiro de mecânica dos solos e engenharia de fundações, Foz do Iguaçu-PR. Anais. V.4, p. 1293-1300.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Ed. Villibor, 1995. p. 169-196.

NÚÑEZ, W. P. **Estabilização físico-química de um solo residual de Arenito Botucatu visando seu emprego na pavimentação**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1991.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas/ 3ª edição**. São Paulo/SP: oficina de textos, 2006.

PRUSINSKI, J. R.; BHATTACHARJA, S. **Effectiveness of Portland cement and lime stabilizing clay soils**. Transportation Research Record, n. 1652, p. 215–227, 1999.

QUEIROZ DE CARVALHO, J.B **Soil properties affecting the lime stabilization of red tropical soil from north east Brazil**. PhD Thesis Doctoral, Universidade de Leeds, Inglaterra, 1979.

RESENDE, M. **Caracterização dos solos tropicais brasileiros: exercícios de reflexão**. Brasília: ABEAS, 1991. 49 p.

SACHETTI, A. S.; FESTUGATO L.; CORTE M. B. **Resistência à compressão simples de um solo artificialmente cimentado reforçado com fibras de vidro**. 2009. Salão de iniciação científica.

SOUZA JUNIOR, J.D. **O Efeito da Energia de Compactação em Propriedades dos Solos Utilizados na Pavimentação do Estado do Ceará**. Tese de mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, CE, 2005.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B. **Mecânica dos solos na pratica da engenharia**. Tradução Antônio José da costa nunes e Maria de Lourdes campos campelo. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A., 1962

THOMPSON, M. R. **Lime reactivity of Illinois soils. Soil Mechanics and Foundations Division** - Proceedings of the American Society of Civil Engineers, v. 92, p. 67–92, 1966 (a).

THOMPSON, M. R. **Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils**. Highway Research Record, Washington D. C., p. 69–82, 1966 (b).

WINTERKORN, H. F.; FANG, H. Y. **Soil Technology and Engineering Foundation Engineering Handbook**. 2. ed. New York, US: Springer, 1991.